

Skripsi Geofisika

**Identifikasi Kedalaman Sumber Air Panas UG Toguraci *Ore Body*
Shallut Menggunakan Metode Elektromagnetik (Studi Kasus PT
Nusa Halmahera Minerals Kabupaten Halmahera Utara Provinsi
Maluku Utara)**

Disusun dan Diajukan Oleh:

LIANI KHAIRUNNISA

H061191040



DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN JUDUL

**Identifikasi Kedalaman Sumber Air Panas UG Toguraci *Ore Body* Shallut
Menggunakan Metode Elektromagnetik (Studi Kasus PT Nusa Halmahera
Minerals Kabupaten Halmahera Utara Provinsi Maluku Utara)**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains

Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH :

LIANI KHAIRUNNISA

H061191040

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN PENGESAHAN

**Identifikasi Kedalaman Sumber Air Panas UG Toguraci Ore Body
Shallut Menggunakan Metode Elektromagnetik (Studi Kasus PT
Nusa Halmahera Minerals Kabupaten Halmahera Utara Provinsi
Maluku Utara)**

Disusun dan Diajukan Oleh:

LIANI KHAIRUNNISA

H061191040

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

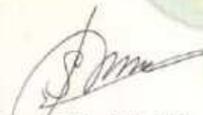
Pada 22 Januari 2024

Dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama



Syamsuddin, S.Si. MT
NIP. 197401152002121001



Dra. Maria, M.Si
NIP. 196307281991032002

Ketua Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin



Dr. Muh. Alimuddin Hanzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Liani Khairunnisa

NIM : H061191040

Program Studi: Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya ilmiah saya berjudul:

**Identifikasi Kedalaman Sumber Air Panas UG Toguraci *Ore Body*
Shallut Menggunakan Metode Elektromagnetik (Studi Kasus PT
Nusa Halmahera Minerals Kabupaten Halmahera Utara Provinsi
Maluku Utara)**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau seluruh skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 22 Januari 2024

Yang Menyatakan



METERAI
TEMPEL
10000
SEFAKOS17311337

Liani Khairunnisa



ABSTRAK

Tambang bawah tanah Toguraci milik PT. NHM memiliki karakteristik unik karena memiliki suhu bawah tanah yang relatif tinggi akibat adanya kontak antara aktivitas tektonik dengan air meteorik (air hujan) dari permukaan. Suhunya bervariasi dari 50 hingga 80 derajat celcius. Hal ini mempersulit proses penambangan dan menjadi masalah keselamatan bagi pekerja dan peralatan yang digunakan di lokasi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi sumber air panas dengan metode elektromagnetik menggunakan alat ADMT 300 HT2 di UG Toguraci *ore body* Shallut. Penelitian ini menunjukkan salah satu langkah penanganan air panas agar tidak menghambat proses penambangan dan isu keselamatan pekerja serta alat yang digunakan. Pengukuran yang dilakukan pada 2 lintasan dengan panjang lintasan 600 meter. Hasil pengukuran dengan metode elektromagnetik masing-masing nilai resistivitas yang diperoleh untuk indikasi adanya potensi air panas *ore body* Shallut berkisar 8 - 28 ohm meter. Indikasi adanya potensi air panas terdapat pada kedalaman 160 – 180 meter di lintasan SRD dan kedalaman 170 – 190 meter di lintasan Decline. Hasil ini dikorelasikan dengan data *drilling geology* dan divalidasi dengan foto core box yang memperlihatkan adanya kandungan kuarsa pada batuan yang diyakini sebagai potensi keberadaan air panas pada lokasi tersebut.

Kata kunci: *tambang bawah tanah, air panas, metode elektromagnetik, ADMT 300 HT2, resistivitas*



ABSTRAC

Toguraci underground mine owned by PT. NHM has unique characteristics because it has relatively high underground temperatures due to contact between tectonic activity and meteoric water (rainwater) from the surface. The temperature varies from 50 to 80 degrees Celsius. This complicates the mining process and becomes a safety issue for workers and equipment used on site. Therefore, this research was carried out to identify hot springs using the electromagnetic method using the ADMT 300 HT2 tool at UG Toguraci ore body Shallut. This research shows one of the steps for handling hot water so as not to hinder the mining process and issue worker safety and the tools used. Measurements were carried out on 2 tracks with a track length of 600 meters. The results of measurements using the electromagnetic method for each resistivity value obtained as an indication of the potential for Shallut ore body hot water ranged from 8 - 28 ohm meters. Indications of the potential for hot water are at a depth of 160 – 180 meters on the SRD track and a depth of 170 – 190 meters on the Decline track. These results were correlated with geological drilling data and validated with core box photos which showed the presence of quartz content in the rock which is believed to be the potential for the presence of hot water at that location.

Key words: underground mine, hot water, electromagnetics method, ADMT 300 HT2, resistivity



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbi'l'aalamin segala puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “**Identifikasi Kedalaman Sumber Air Panas UG Toguraci Ore Body Shallut Menggunakan Metode Elektromagnetik (Studi Kasus PT Nusa Halmahera Minerals Kabupaten Halmahera Utara Provinsi Maluku Utara)**” sebagai syarat untuk menyelesaikan studi Program Sarjana (S1) Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Tak lupa pula sholawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada junjungan dan panutan kita Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua penulis, yaitu Ayahanda **Joni Warga** dan Ibu **Dahlia Mardan** atas setiap doa, dukungan dan motivasi kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini dengan segala hormat dan kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terimakasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Bapak **Syamsuddin, S.Si, MT** selaku pembimbing utama dan Ibu **Dra. Maria, M.Si** selaku pembimbing pertama yang dengan sabar membimbing penulis dan memberikan masukan-masukkan serta nasehat kepada penulis selama penyusunan skripsi ini.
2. Ibu **Makhrani, S.Si, M.Si** dan Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si, MT** selaku tim penguji yang telah memberikan masukan-masukkan, saran dan kritik yang membangun dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak **Syamsuddin, S.Si, M.T** selaku penasehat akademik yang telah memberikan arahan dan nasehat kepada penulis selama masa perkuliahan.



4. Seluruh Dosen Departemen Geofisika dan Staff Pegawai atas ilmu yang telah diajarkan dan bantuannya yang telah diberikan kepada penulis bapak **Abdi Wahyudi Samad** selaku Manager UG Toguraci PT. Nusa Halmahera Minerals

6. **Bapak Michel Yosep Pungus, Doris Aneke, Aditya Prasta dan Kak Erva** selaku pembimbing lapangan
7. Orang tua penulis, ayahanda **Joni Warga** dan Ibunda **Dahlia Mardan**. Adik-adik penulis **Daffa Andhika Permana, Zahra Maharani, dan Aura Dhania Putri** yang selalu mendukung, memotivasi dan mendoakan penulis hingga saat ini.
8. **Oma dan Nenek** serta keluarga besar yang tidak dapat disebutkan satu-persatu atas dukungan dan doa yang selalu dipanjatkan kepada penulis.
9. **Alifa Lulu Feisha** dan **Fakhirah Rachma Bahaweres**, teman seperjuangan selama merantau di Makassar. Terimakasih selalu menemani penulis dalam susah dan senang bersama, mendoakan penulis dan menyemangati penulis.
10. **Balons, Fadila, Farah, Diah dan Nana**. Terimakasih selalu menyemangati dan mendoakan penulis.
11. **Aisyah Sri Rezeki**, teman seperjuangan penulis selama bangku kuliah. Terimakasih untuk waktu yang telah dihabiskan bersama, terimakasih selalu menemani penulis menghadapi berbagai kesulitan, terimakasih untuk kebaikan hatinya kepada penulis.
12. **Asyifah**, terimakasih sudah berbaik hati kepada penulis, suka menolong penulis, sangat siap kapanpun penulis membutuhkan bantuan.
13. **Teman – teman baik penulis selama perkuliahan. Ita, Sarni, Indah, Nanov, Muji, Sindy, Cindy, Ismi, Risda, Dahlia, dan Nur**. Terimakasih atas canda tawanya serta bantuannya kepada penulis.
14. **Teman – teman Geofisika 2019**, terimakasih atas kebersamaannya selama masa perkuliahan.
15. **Teman – teman Psicone19**, atas dukungan dan doa yang selalu dipanjatkan kepada penulis.
16. **Teman – teman KKNT Desa Wisata Maros Gelombang 108 Posko unikamaseang. Nia, Uul, Shani, Ila, Cindy, Ima, Pahrul, Isra, Alif, sep, dan Arsyih**. Terimakasih sudah menjadi keluarga baru bagi penulis in membuat kenangan indah bersama penulis.



17. **Azzahra Kids, Lulu, ade Put, Eky, Nurul, Ifki, dan Alya.** Terimakasih selalu mendoakan penulis dan menyemangati.
18. **Teman – teman seperjuangan tugas akhir di PT. Nusa Halmahera Minerals. Roxanne, Vivi, Dymas, Arif, Raldy, dan Reyhan.** Terimakasih atas kebersamaannya selama di site.
19. Serta kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Makassar, 12 Januari 2024

Penulis



DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRAC	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Ruang Lingkup	3
I.3 Rumusan Masalah.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	3
BAB II	4
II.1 Geologi Regional.....	4
II.2 Stratigrafi.....	6
s Bumi.....	9
de Elektromagnetik	11



II.4.1 Metode Magnetotellurik (MT)	15
II.4.2 Metode Audio Magnetotellurik (AMT).....	16
II.5 Sifat Listrik Batuan.....	20
II.6 Akuifer.....	24
BAB III	26
III.1 Lokasi Penelitian.....	26
III.2 Alat dan Bahan.....	27
III.2.1 Alat.....	27
III.2.2 Bahan.....	28
III.3 Prosedur Penelitian.....	28
III.3.1 Persiapan dan Pengambilan data.....	28
III.3.2 Pengolahan data	28
III.4 Bagan Alir	30
BAB IV	31
IV.1 Hasil	31
IV.1.1 Pengukuran Elektromagnetik Shallut Return Drive (SRD).....	31
IV.1.2 Pengukuran Elektromagnetik Shallut Decline	37
IV.1.3 Hasil Analisa Lintasan Shallut Return Drive Menggunakan LeapFrog ..	41
IV.1.4 Hasil Analisa Lintasan Shallut Decline Menggunakan LeapFrog.....	43



orelasi nilai resistivitas Dengan Data <i>Drilling Geology</i>	45
ibahasan.....	51

IV.2.1 Interpretasi Analisa Penampang Resistivitas	51
IV.2.2 Interpretasi Korelasi Nilai Resistivitas Dengan Data Drilling Geology ..	53
BAB V	57
V.1 Kesimpulan	57
V.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN	61



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Regional Pulau Halmahera (PT. NHM)	5
Gambar 2.2 Stratigrafi Gosowong (PT.NHM).....	8
Gambar 2.3 Perpindahan Panas di Bawah Permukaan (Saptadji, 2001).....	10
Gambar 2.4 Skema Pengukuran Metode Elektromagnetik (Frohlich, 1982)...	12
Gambar 2.5 ADMT 300HT2 (Smart Resources Indonesia)	18
Gambar 2.6 Pengambilan Data Menggunakan ADMT 300HT2 Sensor Elektromagnetik Nirkabel (dokumentasi pribadi).....	19
Gambar 2.7 Tabel Nilai Tahanan Jenis Batuan (Lowrie, 2007)	22
Gambar 2.8 Skema Keberadaan Air Tanah (Lehr dan Keeley, 2005)	25
Gambar 3.1 Peta Lokasi PT NHM	26
Gambar 3.2 Lintasan Pengukuran	27
Gambar 3.3 Bagan Alir	30
Gambar 4.1 Hasil Pengukuran Line A di SRD	32
Gambar 4.2 Hasil Pengukuran Line B di SRD	34
Gambar 4.3 Hasil Pengukuran Line C di SRD	36
Gambar 4.4 Hasil Pengukuran Line D di Shallut Decline	38
Gambar 4.5 Hasil Pengukuran Line E di Shallut Decline.....	40
Gambar 4.6 Hasil LeapFrog Lintasan SRD	42
Gambar 4.7 Hasil LeapFrog Lintasan Decline.....	44
Gambar 4.8 Korelasi Nilai Resistivitas dengan Data <i>Drilling Geology</i> di Lintasan SRD	46



Gambar 4.9 Korelasi Nilai Resistivitas dengan Data <i>Drilling Geology</i> di Lintasan Decline	47
Gambar 4.10 Indikasi Zona Potensi Air Panas di Lintasan SRD.....	49
Gambar 4.11 Indikasi Zona Potensi Air Panas di Lintasan Decline	50
Gambar 4.12 Lithologi UG Toguraci <i>Ore Body</i> Shallut (PT NHM)	54
Gambar 4.13 Hasil Data CSAMT (PT NHM)	55



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 nilai resistivitas sebagian material-material bumi (Telford, 1990) .. 23



Optimized using
trial version
www.balesio.com

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Geofisika adalah ilmu yang menerapkan prinsip-prinsip fisika untuk mengetahui dan memecahkan masalah-masalah yang berkaitan dengan bumi. Metode geofisika dapat digunakan untuk memperkirakan jenis litologi, kedalaman dan struktur lapisan batuan di bawah permukaan. Metode geofisika terbagi menjadi dua yaitu statis dan dinamis (Seran dan Edi, 2021).

Metode elektromagnetik merupakan metode eksplorasi geofisika yang menggunakan sifat konduktif material di bawah permukaan bumi. Metode elektromagnetik geofisika bertujuan untuk menggambarkan resistivitas atau kondisi konduktif material bumi dengan mengukur medan listrik dan medan magnet di permukaan bumi (Sampurno, 2015).

ADMT (*Audiomagnetotelluric Data Management Tools*) 300 HT2 adalah salah satu alat metode elektromagnetik yang dapat memberikan detail resistivitas vertikal batuan dan akuifer dari hasil data longitudinal yang konsisten ke bawah permukaan, dimana hasil nilai resistivitas diperoleh dari pengujian frekuensi tinggi hingga frekuensi rendah dalam satu pengukuran. ADMT 300 HT2 telah digunakan oleh beberapa peneliti untuk menemukan potensi akuifer (Aidu, 2020).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Smart Resources Indonesia, (2020) dengan menggunakan alat ADMT 300 HT2 ditemukan potensi akuifer di daerah penelitian. Selain itu, penelitian Aveta, dkk., (2022) tentang potensi air tanah di Kota Bandung bagian utara dan sekitarnya.

Beberapa penelitian yang juga menggunakan instrumen ADMT dengan rangkaian lainnya, yaitu ADMT 200S oleh Nwanko, R. C., dan Udo, A. A., (2021) i Investigasi Kontaminasi Akuifer Air Tanah akibat Intrusi Lindi akan Teknik Resistivitas Real-Time Resolusi Tinggi di Tempat



Pembuangan Sampah di sekitar Universitas Port Harcourt Environs, Choba, Rivers State, South South, Nigeria dan penelitian oleh Bassey, dkk., (2023) terkait Investigasi Geofisika Potensi Air Tanah di Iwo, Negara Bagian Osun, Nigeria Barat Daya Menggunakan Metode Audiomagnetotelik.

PT. Nusa Halmahera Minerals memiliki dua area penambangan tambang bawah tanah yang dikenal dengan tambang bawah tanah Kencana dan tambang bawah tanah Toguraci yang terletak di Halmahera Utara, Maluku Utara. Area tambang bawah tanah Toguraci merupakan tambang bawah tanah PT. Mineral Nusa Halmahera yang cukup unik, karena tambang Toguraci memiliki suhu air tanah yang relatif tinggi akibat aktivitas tektonik di daerah yang terpapar air meteorik (air hujan) dari permukaan. Suhu berkisar antara 50°C hingga 80°C. Ini melibatkan struktur yang mengandung urat-urat yang mengandung emas dan diperkirakan berasal dari sistem vulkanik yang terletak satu hingga dua km di bawah tambang (Suroto, et al., 2018).

Berdasarkan penelitian terdahulu, Suroto, dkk., (2018) tambang Toguraci terletak di jalur keluaran thermal yang aktif. Dimana tambang Toguraci berada satu jalur dengan mata air panas Akeshu (di Jailolo) yang sekitar 10 km di Barat dari Tambang Toguraci yang mana memiliki kesamaan geokimia yang menghubungkan keduanya dalam aliran yang keluar dari sistem vulkanik satu hingga 2 km dibawah tambang. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan Djainal, (2016) terkait karakterisasi manifestasi panas bumi di daerah Akeshu.

Underground (UG) Toguraci Ore Body Shallut pada saat ini sedang pada tahap *development*, dan terdapat air panas keluar pada *front* penambangan. Keberadaan air panas dapat menghambat proses penambangan, juga menjadi isu keselamatan untuk karyawan dan peralatan yang digunakan pada lokasi tersebut.

Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini untuk identifikasi sumber air panas netode elektromagnetik menggunakan alat ADMT 300 HT2 di UG *Ore Body Shallut* untuk menentukan langkah penanganan air panas agar ighambat proses penambangan dan isu keselamatan pekerja.



I.2 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan menggunakan alat ADMT 300HT2 dengan metode elektromagnetik untuk identifikasi kedalaman sumber air panas yang terdapat di UG Toguraci *Ore Body*.

I.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai resistivitas air panas di UG Toguraci *Ore Body* Shallut?
2. Berapa kedalaman sumber air panas di UG Toguraci *Ore Body* Shallut?

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai resistivitas air panas di UG Toguraci *Ore Body* Shallut
2. Mengidentifikasi kedalaman sumber air panas di UG Toguraci *Ore Body* Shallut dengan metode elektromagnetik



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

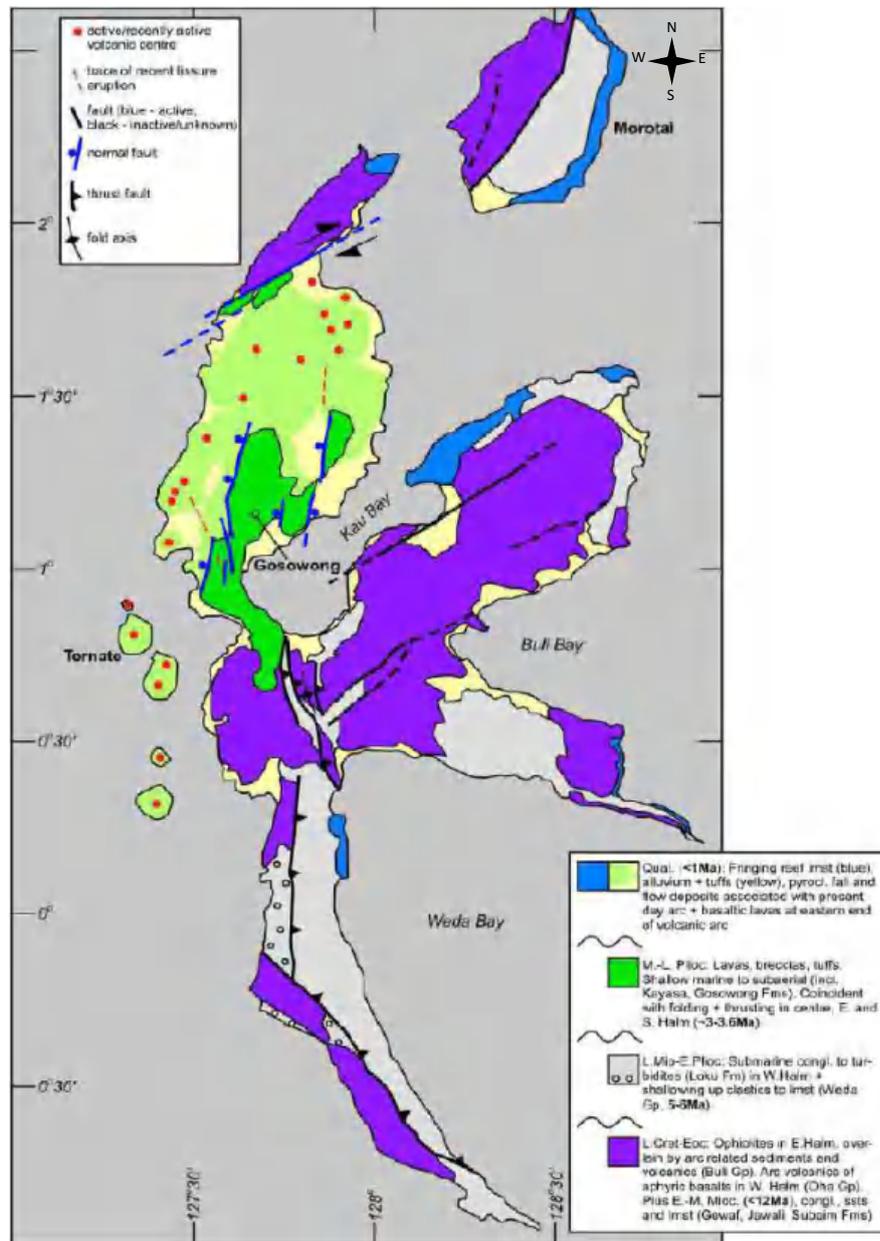
II. 1 Geologi Regional

Kepulauan Indonesia terletak di antara lempeng tektonik Australia, Eurasia, Filipina, dan Samudra Pasifik. Laut Maluku, sebelah barat Halmahera, merupakan zona tumbukan antara busur vulkanik Sangihe dan Halmahera. Lempeng Maluku bersubduksi ke arah timur di bawah lempeng Halmahera dan Filipina sejak Paleogen dan menciptakan empat busur vulkanik di cabang barat Halmahera. Keempat formasi sedimen vulkanik tersebut adalah Formasi Bacan (Paleogen), Formasi Gosowong (Miosen Atas), Formasi Kayasa (Pliosen) dan Formasi Vulkanik Kuartar yang masih aktif hingga saat ini (Marjoribanks, 1997 dalam Ronald, dkk, 2015).

Peta regional pulau Halmahera dan pulau di sekitarnya seperti yang diperlihatkan oleh gambar 2.1. Fisiografi Pulau Halmahera terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu Mandala Halmahera Timur, Halmahera Barat, dan Kepulauan Vulkanik Kuartar. Secara umum, geologi lengan timur dan barat Halmahera sangat berbeda, tidak hanya secara tektonik, tetapi juga perkembangan formasi geologi menyebabkan jalur yang sangat berbeda. di Halmahera Timur, batuan ultrabasa ditemukan pada batuan dasar dan batuan sedimen atas Formasi Dodoga Eosen dan Formasi Dorosagu. Aktivitas vulkanik terjadi selama sedimentasi Eosen Akhir dan Oligosen (Ronald, dkk., 2015).

Geologi daerah kajian Kao teluk yang merupakan bagian dari Mandala Geologi Halmahera Barat terdiri dari batuan vulkanik prekognitif awal yang telah menjadi jalur busur vulkanik. Batuan vulkanik berumur Oligosen-Miosen dan tersebar luas di wilayah tersebut. Terjadi di lingkungan laut, yang secara bertahap beralih ke an darat selama proses pendakian. Batuan vulkanik ini umumnya telah ni propilisasi dan pelapukan, mengandung silika minor dan urat kuarsa (vena, dan terdiri dari batupasir, serpih, napal, dan batugamping) (2019).





Gambar 2.1 Peta Regional Pulau Halmahera (PT. NHM)

Sebaran mineralisasi Gosowong sangat dipengaruhi oleh geseran normal Barat Laut – Tenggara ke arah Timur Laut dan kontak litologi antara lava andesit dengan batuan vulkanik. Urat Gosowong termasuk dalam sistem urat epitermal emiringan rata-rata 45° ke Timur atau Timur Laut magnetik. Panjang yang diketahui sejauh ini sekitar 400 m dan perpanjangan ke bawah 100 m. Kondisi geologi Gosowong terdiri dari batuan vulkanik dan batuan granodiorit kuarsa. Mineralisasi emas dikaitkan dengan urat kuarsa-



ephemeris, jenis urat yang strukturnya dihasilkan dari lipatan dan patahan. Urat Gosowong mengandung batuan lava – andesit dan berbagai endapan vulkanik yang terdiri dari batu lempung, batu lanau, batu pasir halus kasar dan konglomerat. Ini mirip dengan batuan dasar batu pasir. Batuan vulkanik halus (tanah liat) secara menyeluruh mengalami ubahan *prahydrothermal hematitic* dari lingkungan pelapukan paleo (*paleo-weathering*) (Saputra, 2019).

II. 2 Stratigrafi

Kolom stratigrafi daerah kerja dari PT. Nusa Halmahera Minerals yang ditunjukkan oleh gambar 2.2. Batuan yang membentuk masing-masing formasi dijelaskan secara rinci, dari yang tertua hingga yang termuda, sebagai berikut (Ronald, dkk., 2015):

1. Formasi Gosowong

Formasi Gosowong merupakan batuan tertua di daerah penelitian dan terdiri dari dua batuan vulkanik bawah laut masif yang berbeda komposisi dan letak stratigrafinya, yaitu paket andesit dan paket basal. Penanggalan radiometrik basaltandesit dari Formasi Gosowong memberikan umur antara 2,6 dan 5,4 Ma (Vasconcelos, 1998 dalam Ronald, dkk, 2015).

a. Paket andesitik, terdiri dari lava plagioklastik feldspar-pyrene berbutir halus, lava terbreksi otomatis dan paket kaca vulkanik. Batuan vulkanik terdiri dari dari konglomerat, batupasir, dan batulumpur. Satuan lava berwarna abu-abu hingga kehijauan dan berbutir halus, dengan plagioklas dan fenokris mafik halus di massa dasar granular. Kaca plagioklas halus dan kristal dan memblokir oksida. Satuan gunung api bertipe polimiktik yang didukung oleh klas-klas sekunder dan tersusun dengan baik. Batulumpur vulkanik dicirikan oleh hematit, yang diinterpretasikan sebagai hasil pengendapan paleooksidasi di lingkungan laut dangkal.

paket basaltik, secara selaras mendasari paket andesitik. Bagian bawah satuan basal belum dibor, sehingga ketebalan satuan basal cukup besar, lebih dari 650 meter. Satuan basalt terdiri dari rangkaian augit piroksen



berbutir halus, lava piroksen sedang, dan satuan batuan vulkanik. Endapan batuan vulkanik meliputi konglomerat dan batupasir. Satuan lava berwarna abu-abu tua hingga kehijauan dan butir halus, dan massa dasar butir halus mengandung fenokris plagioklas-augit dan kristal plagioklas-augit-apatit, kaca, dan kristal oksida yang saling terkait.

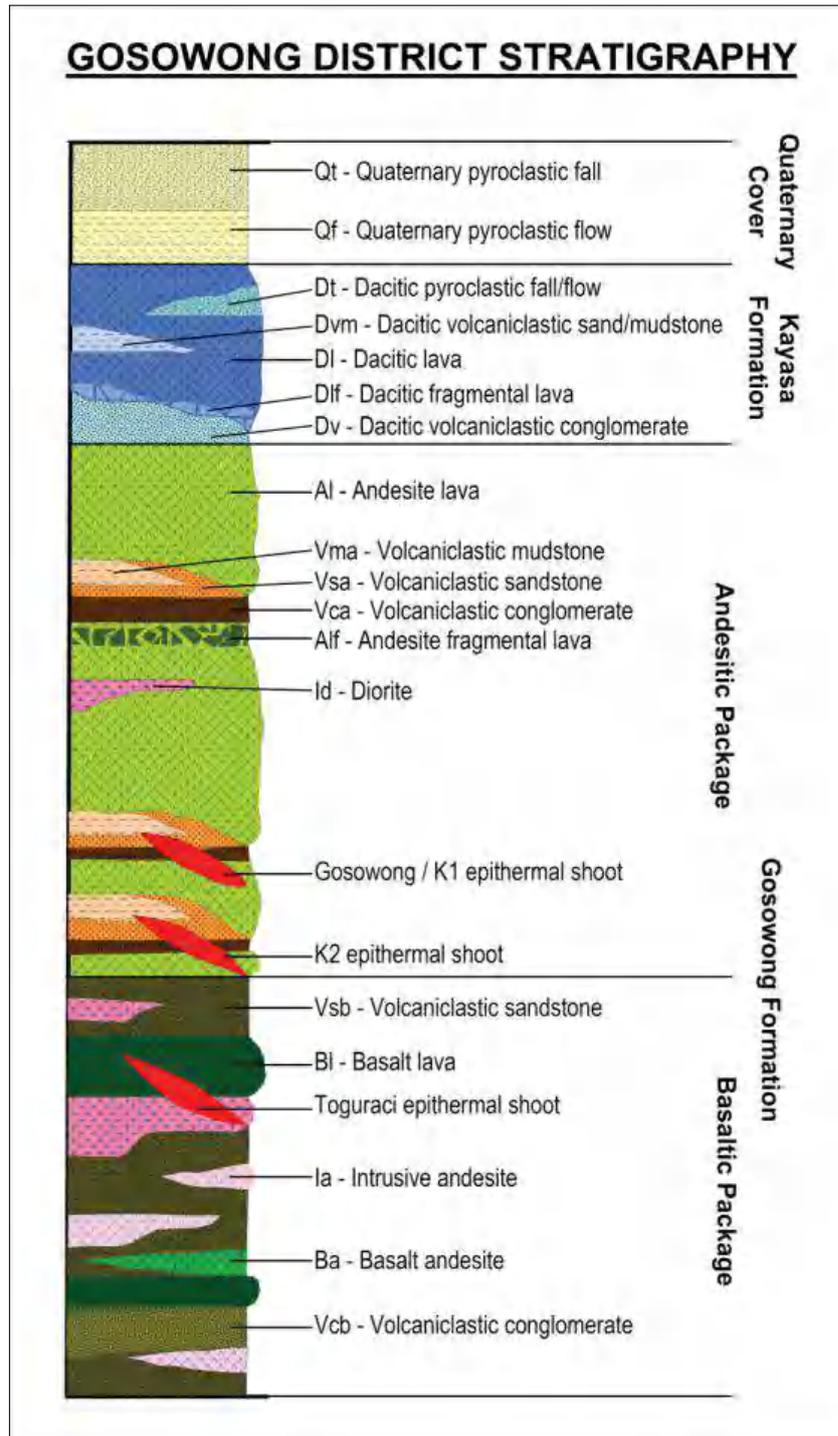
2. Formasi Kayasa

Formasi Kayasa secara tidak selaras menindih Formasi Gosowong. Marjoribanks (1997) dalam Ronald, dkk, (2015) mengamati dari foto udara bahwa kemiringan perlapisan Formasi Kayasa terlihat lebih landai daripada Formasi Gosowong. Batuan vulkanik terdiri dari serangkaian dasit lava dengan struktur pyrene dari endapan feldspar dan vulkanik klastik butir halus hingga sedang. Batuan ini dicirikan oleh fenokrit kuarsa yang terbungkus ringan dan sebelumnya disebut kuarsa andesitik. Alterasi propilit Formasi Kayasa tidak berubah menjadi sedang (perubahan regional), sebaliknya terlihat jelas (menyentuh) dan Formasi Gosowong yang sangat teralterasi. Berdasarkan metode radiometrik, umur Formasi Kayasa di daerah tersebut adalah 3,7 juta tahun (Vasconcelos, 1998 dalam Ronald, dkk, 2015). Dua formasi atas kemudian diintrusi secara lokal oleh porphyriadesite dan diorit kuarsa, kadang-kadang diasosiasikan dengan mineralisasi emas-tembaga.

3. Endapan Kuarter

Urutan kuarter unit piroklastik berkembang di daratan rendah di selatan situs. Urutan piroklastik terdiri dari jatuhan suberik dan kemungkinan aliran pengendapan yang terdiri dari material yang terkonsolidasi dengan buruk atau tersotir dengan baik, abu vulkanik yang diendapkan secara masif, batu apung/api, dan puing-puing vulkanik lainnya.





Gambar 2.2 Stratigrafi Gosowong (PT.NHM)



alian yang terdapat pada tambang bawah tanah Toguraci PT. NHM asikan sebagai endapan epitermal. Endapan epitermal didefinisikan endapan sistem hidrotermal yang terbentuk pada kedalaman dangkal,

biasanya di busur vulkanik yang dekat dengan permukaan. Endapan epitermal merupakan hasil dari sistem hidrotermal skala besar yang terletak pada sumber panas magmatik atau sumber air meteorik di lingkungan vulkanik (Saputra, 2019).

Secara umum, endapan epitermal terbentuk pada suhu yang relatif rendah antara 50°C - 250°C . Adanya kontak langsung antara penerobosan diorite secara *dike* pada batuan pengikat (basalt) mengakibatkan suhu aliran air tanah menjadi tinggi. Gejala-gejala ini menyebabkan mineralisasi pada rekahan kosong. Kumpulan deposit ini meliputi mineral emas (Au) dan perak (Ag) serta mineral ikutannya berupa mineral kalsit, mineral zeolit, dan mineral kuarsa. Keadaan tersebut disebabkan oleh Pulau Halmahera yang berbentuk busur pulau akibat tumbukan lempeng di Samudera Pasifik bagian barat. Wilayah ini merupakan pertemuan tiga lempeng yaitu lempeng Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia dimana memiliki keadaan geologi yang hampir kompleks dengan struktur sesar berupa sinklin dan antiklin serta struktur sesar yang terdiri dari sesar normal dan sesar naik. Keadaan ini yang menyebabkan tambang Toguraci PT. NHM memiliki suhu air tanah yang relatif tinggi hasil kontak aktivitas tektonik yang ada pada daerah tersebut dengan air meteorik dari permukaan (Saputra, 2019).

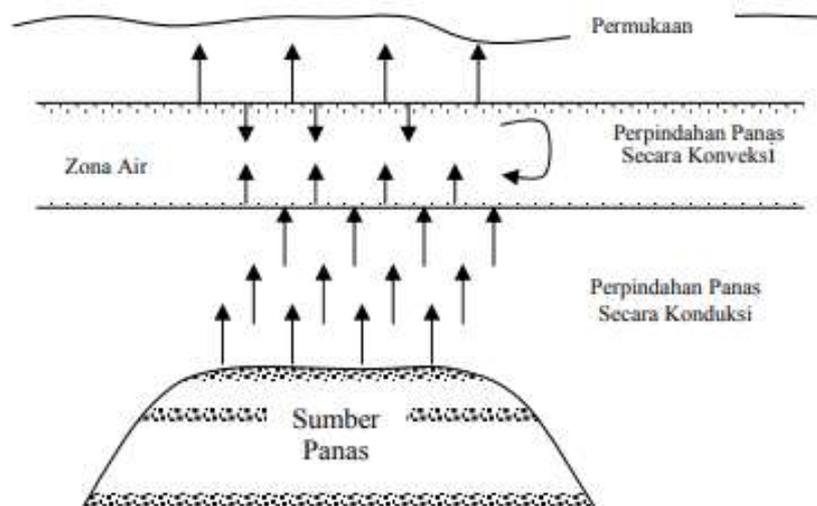
II. 3 Panas Bumi

Material panas yang ada di bawah permukaan bumi yang memanjang hingga kedalaman beberapa ribu kilometer menyebabkan panas mengalir dari sumber panas ke permukaan bumi. Secara alami, hal ini menyebabkan perubahan suhu dari bawah ke permukaan, dengan gradien suhu rata-rata $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Secara umum, nilai aliran panas pada batas antara dua lempeng (di zona subduksi) lebih tinggi dari rata-rata. Tentu saja, ini juga mengarah pada fakta bahwa daerah tersebut gradien suhu lebih besar dari gradien suhu lebih besar dari gradien suhu rata-rata, yang bisa mencapai $70\text{-}80^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Saptadji, 2001).



2.3 di bawah ini memperlihatkan bahwa sistem panas bumi terbentuk hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang cara konduksi dan secara konveksi. Perpindahan panas secara konduksi

terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena gaya apung (*bouyancy*). Air karena gaya gravitasi selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak kebawah, akan tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksim (Saptadji, 2001).



Gambar 2.3 Perpindahan Panas di Bawah Permukaan (Saptadji, 2001).

Pembentukan panas bumi dipengaruhi oleh beberapa proses geologi yang terjadi di sepanjang jalur gunung berapi. Proses geologi yang relevan adalah aktivitas magmatik dan proses pemindahan larva yang tertinggal akibat letusan gunung berapi. Aktivitas magmatik terjadi berupa uap dan gas yang merembes ke dalam pori-pori gunung api, sedangkan proses pengangkatannya mengarah pada patahan di sepanjang jalur gunung berapi. Aspek-aspek tersebut menyebabkan tatanan mata air panas bumi, dimana proses *upwelling* mengangkat daerah a, menciptakan sistem pegunungan yang berfungsi sebagai resapan air ir yang dipanaskan dan terkumpul di antara lapisan batuan dasar (uap)



yang kedap air menyebabkan air batuan dasar dan uap berada di bawah tekanan hidrostatik yang tinggi (Riputra & Malik, 2021).

Komponen sistem panas bumi terdiri dari tiga komponen utama yaitu keberadaan batuan *reservoir permeable*, keberadaan air pembawa panas, dan sumber panas itu sendiri. Komponen-komponen tersebut saling berhubungan dan membentuk suatu sistem yang mampu menyalurkan energi panas dari bawah permukaan hingga ke permukaan bumi (Goff & Janik, 2000).

II. 4 Metode Elektromagnetik

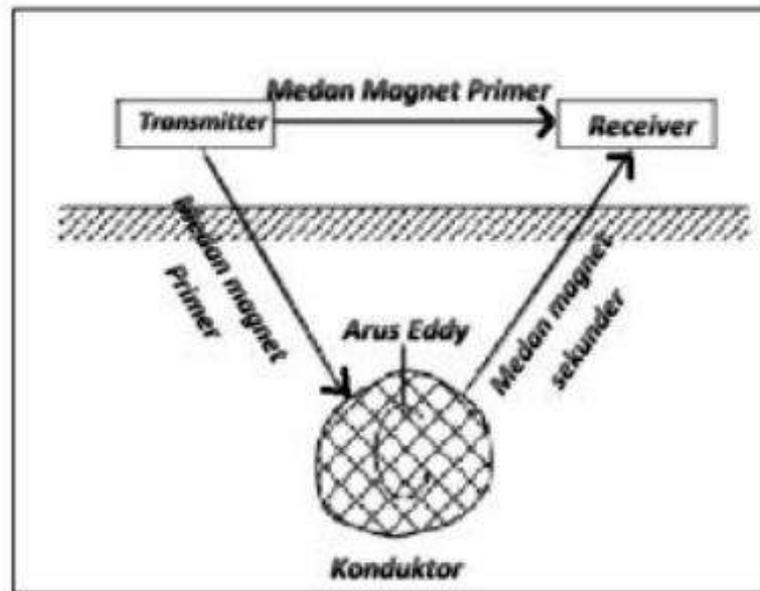
Metode Elektromagnetik (EM) adalah salah satu metode geofisika untuk mengetahui anomali di bawah permukaan yang memanfaatkan sifat medan magnet dan medan listrik (Buttler, 2010). Survei elektromagnetik (EM) pada dasarnya diterapkan untuk mengetahui respons bawah permukaan menggunakan perambatan gelombang elektromagnetik yang terbentuk akibat adanya arus bolak-balik dan medan magnetik. Dasar persamaan metode elektromagnetik dapat dilihat pada lampiran 1. Medan elektromagnetik primer dihasilkan oleh arus bolak-balik yang melewati sebuah kumparan yang terdiri dari lilitan kawat. Respons bawah permukaan berupa medan elektromagnetik sekunder dan resultan medan terdeteksi sebagai arus bolak-balik yang menginduksi arus listrik pada koil penerima (receiver) sebagai akibat adanya induksi elektromagnetik (Aswan, dkk., 2014).

Gambar 2.4 di bawah memperlihatkan ketika medan elektromagnetik menjalar pada lapisan *subsurface* homogen, tidak akan ada perbedaan antara medan yang menjalar di atas permukaan dengan yang menjalar di bawah permukaan. Jika terdapat anomali konduktif, komponen magnetik dari medan elektromagnetik menginduksi terjadinya arus *eddy* di sepanjang anomali konduktif tersebut. Arus *eddy* kemudian menghasilkan medan elektromagnetik sekunder yang menembus

receiver dan menimbulkan interaksi pada arus receiver yang berupa Receiver juga mendeteksi medan elektromagnetik primer yang menjalar Respon receiver merupakan resultan dari medan elektromagnetik primer



dan medan elektromagnetik sekunder. Sehingga respon yang terukur akan berbeda pada kedua fasa dan amplitudo relatif terhadap medan elektromagnetik primer yang menjalar di udara. Perbedaan antara medan elektromagnetik pada transmitter dan receiver menunjukkan keberadaan anomali konduktif dengan informasi geometri dan parameter elektriknya (Frohlich, 1982).



Gambar 2.4 Skema Pengukuran Metode Elektromagnetik (Frohlich, 1982).

Persamaan maxwell merupakan hukum yang menjelaskan perilaku gelombang EM diformulasikan sebagai berikut (Keller dan Frischknecht, 1966):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

Dengan:

\mathbf{E} = medan listrik (Volt/m)

\mathbf{B} = fluksi magnetik (Weber/ m^2 atau Tesla)

\mathbf{J} = arus (Ampere/ m^2)

\mathbf{D} = muatan listrik (Coulomb/ m^2)



q = muatan listrik (Coulomb)

ε = permivitas listrik (Faraday/m)

Persamaan (2.1) adalah hukum Faraday, yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnet terhadap waktu menghasilkan medan listrik. Persamaan (2.2) merupakan hukum Ampere-Maxwell, yang menyatakan bahwa perubahan medan listrik terhadap waktu dan laju perubahan arus listrik yang melalui permukaan menimbulkan arus medan listrik. Persamaan (2.3) adalah hukum Gauss, yang menyatakan bahwa arus medan listrik dalam ruang permukaan tertutup sebanding dengan muatan total dalam ruang permukaan tertutup. Persamaan (2.4) adalah hukum Gauss, yang menyatakan bahwa medan magnet yang ditransmisikan melalui suatu permukaan tertutup adalah nol karena tidak mempunyai kutub magnet yang terisolasi.

Hubungan antara intensitas medan dengan fluks yang terjadi pada medium dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.7)$$

Dengan:

μ = permeabilitas magnetik (Henry/m)

\mathbf{H} = medan magnet (Ampere/m)

Dengan menggunakan operasi curl ($\nabla \times$) pada persamaan Maxwell (2.1) dan (2.3), diperoleh persamaan gelombang medan listrik dan medan magnetik sebagai berikut:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (2.9)$$



$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times (\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.10)$$

$$\nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = \nabla \times (\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.11)$$

Dari rumus vektor identitas ($\nabla \times \nabla \times A = \nabla \cdot \nabla \cdot A - \nabla^2 A$), substitusikan persamaan (2.2) ke dalam persamaan (2.9) diperoleh persamaan gelombang medan listrik dalam domain waktu sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.12)$$

Demikian pula persamaan gelombang medan magnet dalam domain waktu diperoleh sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma (\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}) + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Dalam pendekatan magnetotellurik, medan elektromagnetik berubah secara sinusoidal terhadap waktu. Dimana medan listrik (E) dan medan magnet (B) yang dihasilkan dari amplitudo medan listrik (E_0) dan amplitudo medan magnet (B_0), kecepatan sudut ω dalam hal ini ($\omega = 2\pi f$ atau $\omega = \frac{2\pi}{T}$) dan panjang gelombang $\lambda = \frac{2\pi}{|k|}$ (k = bilangan gelombang). Jika berubah terhadap waktu, maka penyelesaian persamaan (2.12) dan (2.13) dapat dinyatakan sebagai fungsi periodik sinusoidal, yaitu:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - kz} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{i\omega t - kz} \quad (2.15)$$

Dengan menggunakan penyelesaian persamaan (2.14) ke dalam persamaan (2.12) diperoleh persamaan gelombang medan listrik menjadi:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon_0 i^2 \omega^2 \mathbf{E} \quad (2.16)$$

Pada persamaan gelombang medan magnet diperoleh dari solusi persamaan (2.15) ke dalam persamaan (2.13) menjadi:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{B} + \mu_0 \varepsilon_0 i^2 \omega^2 \mathbf{B} \quad (2.17)$$



Perambatan dalam medium bumi menyebabkan gelombang yang merambat memiliki frekuensi yang rendah maka konduktivitas batuan $\sigma > \varepsilon\omega$, sehingga suku kedua yang memuat permitivitas listrik (ε) dapat bernilai nol. sehingga persamaan (2.16) dan (2.17) dapat ditulis sebagai berikut (Grandis, 2009):

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{E} \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{B} \quad (2.19)$$

Dengan: $k^2 = i\omega\sigma\mu_0$ atau $k = \sqrt{i\omega\sigma\mu_0}$

Didapatkan persamaan gelombang EM sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = k^2 \mathbf{E} \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = k^2 \mathbf{B} \quad (2.21)$$

II. 4. 1 Metode Magnetotelurik (MT)

Metode magnetotelurik (MT) adalah teknik eksplorasi geofisika elektromagnetik yang menggambarkan sifat listrik yang terdistribusikan di bawah permukaan bumi (Abderahman, 2019 dalam Aveta, dkk, 2022). Energi yang digunakan pada teknik MT berasal dari sumber alami eksternal. Energi eksternal yang disebut medan elektromagnetik primer ketika mencapai permukaan bumi akan terpantulkan kembali dan sebagian lagi menembus ke dalam bumi. Bumi dalam hal ini bertindak sebagai konduktor yang baik, sehingga arus listrik (atau dikenal arus telurik) yang diinduksikan akan menghasilkan medan magnet sekunder (Aveta, dkk, 2022).

Metode magnetotellurik memiliki jangkauan penetrasi yang lebih dalam dibandingkan dengan metode geolistrik. Metode magnetotelurik dapat mengetahui sebaran batuan dan lapisan di bawah permukaan dengan melihat nilai resistivitasnya atau tahanan jenisnya. Selain itu model konseptual, luas dan batas panas bumi dapat diketahui (Kadir, 2011 dalam Syahwanti, dkk, 2014).



Semua sumber medan magnetik tersebut memiliki nilai yang bervariasi terhadap waktu, tetapi yang dimanfaatkan pada Metode Magnetotellurik hanya medan magnetik yang berasal dari luar bumi yang memiliki rentang frekuensi lebih besar (Syahwanti, dkk, 2014). Sumber magnetik yang berasal dari luar bumi yaitu seperti sambaran petir dan angin matahari. Frekuensi yang dihasilkan oleh angin matahari kurang dari 1 Hz, sehingga jarak penetrasi medan magnetik meluas hingga kedalaman yang cukup jauh (Simpson dan Bahr, 2005). Frekuensi yang dihasilkan petir atau sambaran petir lebih besar dari 1 Hz (Agung, 2009 dalam Kadir, 2011).

II. 4. 2 Metode *Audio Magnetotelluric* (AMT)

Metode MT yang mampu mengukur resistivitas batuan dan memiliki efisiensi tinggi salah satunya adalah metode Audio Magneto Telluric atau AMT (Berketold, 1983). Metode AMT menggunakan gelombang elektromagnetik alami berfrekuensi 8 Hz - 20 kHz (Cagniard, 1953). Sumber energi elektromagnetik alam berasal dari petir dan angin matahari. Frekuensi yang dihasilkan oleh petir memiliki frekuensi lebih kecil yaitu dari 1-400 Hz. Frekuensi yang dihasilkan oleh angin matahari memiliki frekuensi lebih kecil yaitu dari 0,0005-1 Hz sehingga memiliki penetrasi yang lebih dalam (Reynolds, 1995).

Arus telurik muncul dari proses ionisasi hidrogen menjadi plasma di permukaan matahari. Plasma yang mengandung proton dan neutron memiliki kecepatan rendah dan berubah terhadap waktu (angin matahari). Ketika angin matahari berada di dekat medan magnet Bumi, muatan positif dan negatif dalam plasma menyebar ke arah yang berlawanan, menyebabkan arus listrik dan medan EM. Medan EM yang dibawa oleh angin matahari terus merambat ke ionosfer dan berinteraksi dengan ionosfer. Interaksi ini menyebabkan adanya gelombang EM yang mengalir di lapisan ionosfer. Gelombang EM kemudian merambat ke tanah

karakteristik yang berubah dari waktu ke waktu. Saat medan EM is tanah, ia berinteraksi dengan bahan tanah yang dapat bertindak sebagai

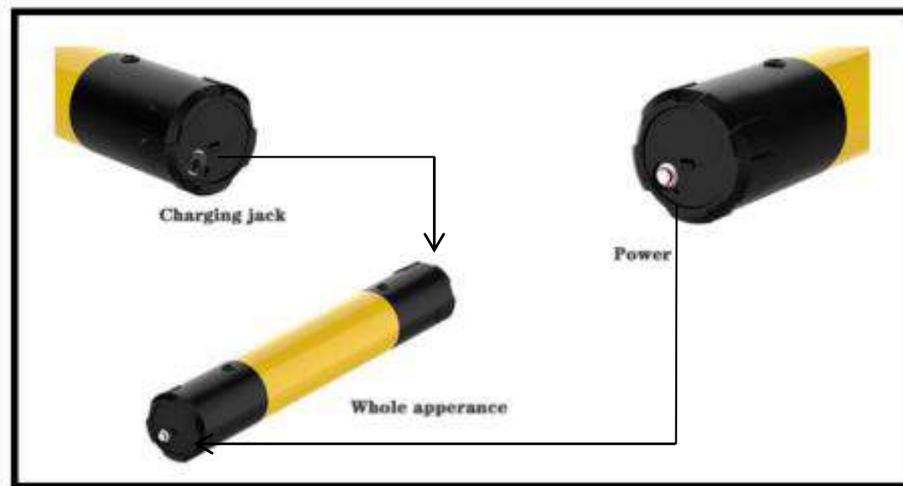


konduktor. Arus induksi ini menginduksinya di permukaan bumi, menghasilkan arus eddy yang disebut arus telurik (Satrio dan Koesuma, 2012).

Salah satu alat yang digunakan pada metode AMT adalah ADMT 300 HT2. Dimana ADMT 300 HT2 (*Audiomagnetotelluric Data Management Tools*) adalah alat khusus studi geofisika pada metode elektromagnetik dalam pendugaan potensi akuifer yang sudah sukses digunakan negara-negara kesulitan bahan baku air seperti negara di Benua Afrika, India, Thailand, dan sangat populer di China. Alat ini sederhana, mudah dioperasikan, sensitif terhadap air, efisien, dan dapat dioperasikan di lahan beton/aspalt atau berbatu. ADMT 300 HT2 yang memberikan detail resistivitas vertikal batuan dan akuifer dari hasil data longitudinal yang konsisten ke bawah permukaan, dimana hasil nilai resistivitas diperoleh dari pengujian frekuensi tinggi hingga frekuensi rendah dalam satu pengukuran. Frekuensi tinggi akan menghasilkan data resistivitas pada kedalaman yang dangkal dan frekuensi rendah akan menghasilkan data resistivitas pada kedalaman yang cukup dalam (Smart Resources Indonesia, 2020).

ADMT merupakan produk generasi baru instrumen cerdas yang dikembangkan dan dirancang oleh perusahaan AIDU bersama dengan *Guilin Institute of Hydrogeological Exploration and Research*. Pembaruan terbaru dari Seri ADMT-S menjadi seri HT memiliki fitur pengukuran resistivitas dengan menggunakan medan listrik alami, dimana hasil yang diukur sangat cepat (*Fast*) serta peningkatan kualitas data (Akurat), sederhana dalam pengoperasian (*Simple*) dan dapat dikerjakan hanya dengan sangat sedikit *Manpower* (Efisien) seperti yang terlihat pada gambar 2.5 dibawah (Smart Resources Indonesia, 2020).

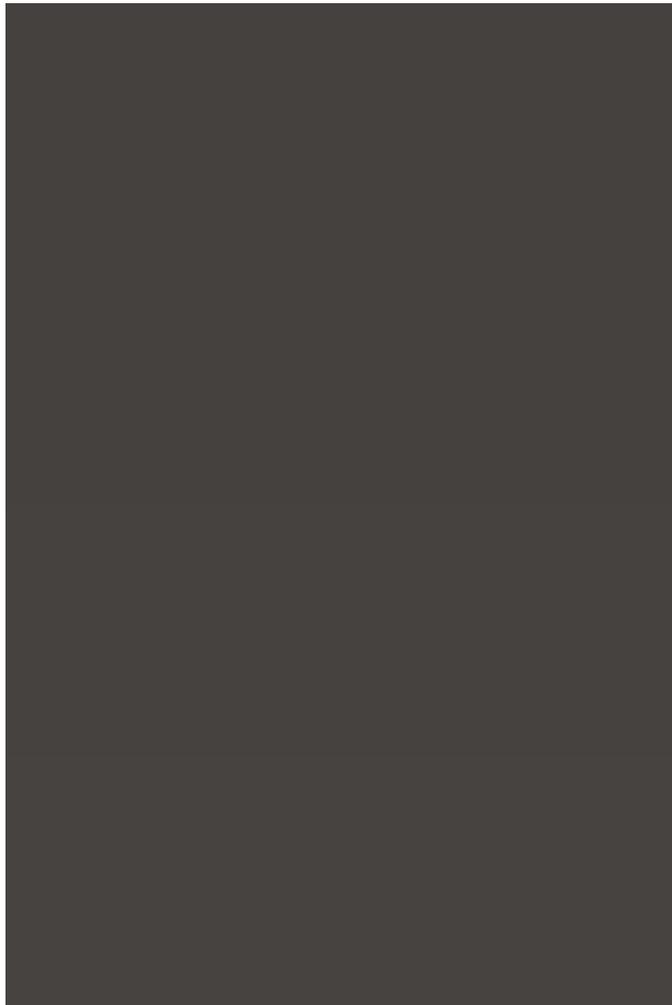




Gambar 2.5 ADMT 300HT2 (Smart Resources Indonesia)

Berdasarkan penelitian, desain dan eksplorasi selama lebih dari 40 tahun, metode penghitungan data yang kompleks dapat direalisasikan melalui ponsel atau komputer tablet untuk menghitung inversi, pemetaan cepat, menggambar langsung peta dan grafik kontur 2D/3D, juga data dapat *backup* di *cloud* serta fungsi cerdas lainnya. Instrumen dihubungkan dengan ponsel atau komputer tablet melalui Bluetooth-nya sendiri, dan dapat langsung mengoperasikan instrumen, transmisi data, dan sebagainya di ponsel. Instrumen dapat menggunakan elektroda atau sensor elektromagnetik nirkabel (*probe*) untuk input sinyal, tidak perlu menarik kabel, pengukuran dengan metoda *stop & go* seperti terlihat pada gambar 2.6. Probe elektromagnetik memperoleh resistivitas dengan mengukur medan magnet menjadi sinyal medan listrik. Metode elektroda secara langsung memperoleh resistivitas dengan mengukur sinyal medan listrik (Smart Resources Indonesia, 2020).





Gambar 2.6 Pengambilan data menggunakan ADMT 300HT2 sensor elektromagnetik nirkabel (Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan prinsip bahwa gelombang elektromagnetik dari frekuensi yang berbeda memiliki *skin depth* yang berbeda pada media konduktif, urutan respon elektromagnetik bumi dari frekuensi tinggi ke frekuensi rendah diukur di permukaan untuk mempelajari perbedaan sifat-sifat listrik batuan di bawah permukaan tanah pada kedalaman yang berbeda dan menentukan genesanya (Smart Resources Indonesia, 2020). Dimana prinsip kerja ADMT 300HT2 sebagai berikut:



menentukan resistivitas listrik bumi (ρ):

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (2.22)$$

Perbedaan fasa (Φ):

$$\Phi = \Phi E - \Phi H \quad (2.23)$$

Skin Depth (δ):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho\alpha}{f}} \quad (2.24)$$

Kedalaman (D):

$$D = 356 \sqrt{\frac{\rho\alpha}{f}} \quad (2.25)$$

Panjang Gelombang (λ):

$$\lambda = 2\pi\delta \quad (2.26)$$

II. 5 Sifat Listrik Batuan

Resistivitas adalah karakteristik batuan yang menunjukkan kemampuan batuan tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Aliran arus listrik dalam batuan dan mineral dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu (Milsom, 2003):

1. Konduksi Elektronik

Konduksi ini terjadi jika batuan/mineral mempunyai banyak elektron bebas sehingga arus listrik yang dialirkan dalam batuan oleh elektron-elektron bebas tersebut (Milsom, 2003). Aliran listrik ini juga dipengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang dilewatinya. Salah satu sifat atau karakteristik batuan tersebut adalah resistivitas (tahanan jenis) yang menunjukkan kemampuan bahan untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka semakin sulit bahan tersebut hantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya.

uksi Elektrolitik

uksi ini terjadi jika batuan/mineral bersifat porous dan pori-porinya terisi cairan elektrolitik (Milsom, 2003). Sebagian besar batuan merupakan



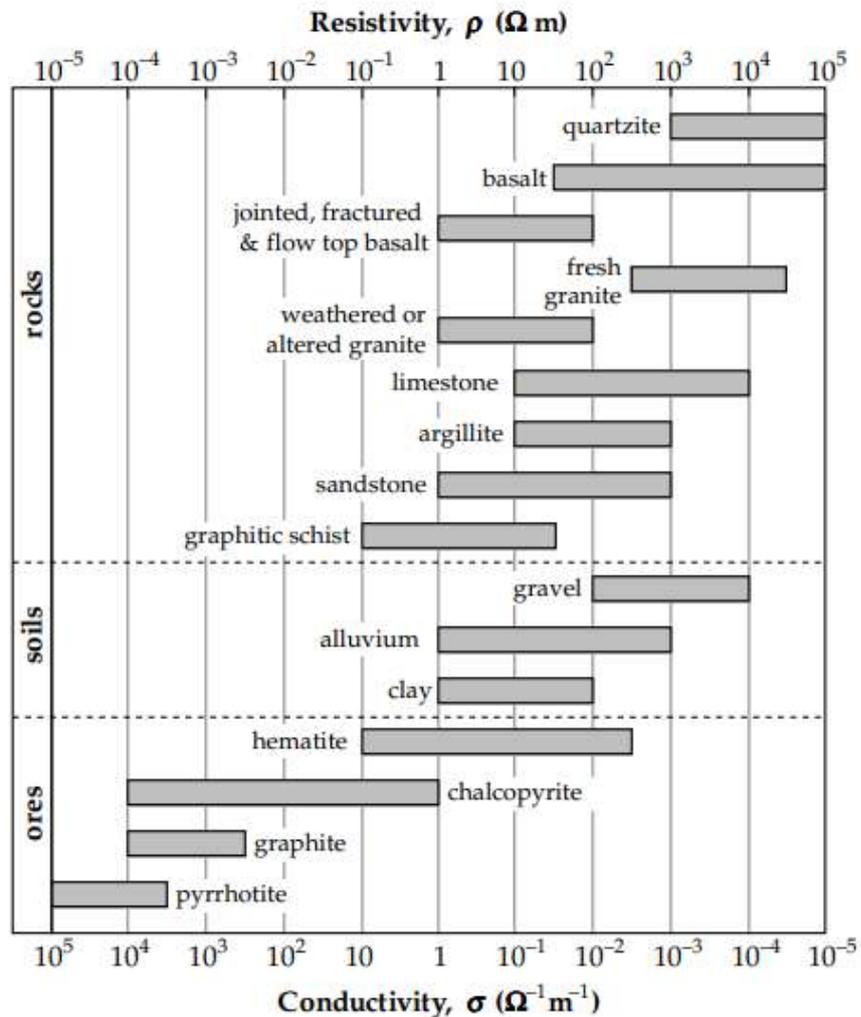
konduktor yang buruk dan memiliki resistivitas yang sangat tinggi. Namun pada kenyataannya batuan biasanya bersifat porous dan memiliki pori-pori yang terisi oleh fluida, terutama air. Akibatnya batuan-batuan tersebut menjadi konduktor elektrolitik, dimana konduksi arus listrik dibawa oleh ion-ion elektrolitik dalam air. Konduktivitas dan resistivitas batuan porous bergantung pada volume dan susunan pori-porinya. Konduktivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan bertambah banyak, dan sebaliknya resistivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan berkurang (Lowrie, 2007).

3. Konduksi Dielektrik

Konduksi ini terjadi jika batuan/mineral bersifat dielektrik terhadap aliran arus listrik dimana pada kasus ini terjadi polarisasi saat batuan dialiri arus listrik (Milsom, 2003). batuan atau mineral yang mengalami polarisasi tersebut mempunyai elektron bebas sedikit, bahkan tidak ada sama sekali. Elektron dalam batuan berpindah dan berkumpul terpisah dalam inti karena adanya pengaruh medan listrik di luar, sehingga terjadi polarisasi (Lowrie, 2007)

Survei kelistrikan dapat didasarkan pada sumber alami potensial dan arus. Lebih umum, mereka melibatkan deteksi sinyal yang diinduksi dalam badan konduktor bawah permukaan oleh medan listrik dan magnet yang dihasilkan di atas tanah. Investigasi dalam kategori ini meliputi metode resistivitas dan elektromagnetik. Sifat fisik batuan yang penting untuk survei listrik adalah permitivitas (untuk georadar) dan resistivitas (atau konduktivitas), yang menjadi dasar beberapa teknik. Anomali muncul, misalnya, ketika konduktor yang baik (seperti tanggul atau badan bijih yang termineralisasi) hadir dalam batuan yang memiliki resistivitas yang lebih tinggi. Kontras resistivitas antara badan bijih dan batuan induk seringkali besar, karena resistivitas batuan dan mineral yang berbeda sangat bervariasi seperti terlihat pada gambar 2.7 (Lowrie, 2007).





Gambar 2.7 Tabel Nilai tahanan jenis batuan (Lowrie, 2007).

Pada tahun 1990, Telford menyiapkan tabel resistivitas material bawah tanah ditunjukkan pada Tabel 2.1, yang tujuannya adalah untuk membedakan setiap jenis material dan menemukan terjadinya penyimpangan yang diperoleh dari pengukuran lapangan. Sifat konduktivitas listrik tanah dan batuan di permukaan sangat dipengaruhi oleh jumlah air, kadar garam/salinitas air dan sebaran air di dalam tanah dan batuan. Konduktivitas listrik batuan yang mengandung air sangat ditentukan terutama oleh sifat air, yakni elektrolit (larutan garam yang terkandung di dalamnya) yang terdiri dari anion dan kation yang bergerak bebas dalam air. Medan listrik eksternal menyebabkan kation dalam larutan elektrolit bergerak menuju kutub negatif sedangkan anion menuju kutub positif. Tentu



saja, batuan berpori atau pun tanah yang terisi air, nilai resistivitas (ρ) listriknya berkurang dengan bertambahnya kandungan air. Begitu pula sebaliknya, nilai resistivitas listriknya akan bertambah dengan berkurangnya kandungan air (Telford, 1990).

Tabel 2.1 Nilai Resistivitas Sebagian Material-Material Bumi (Telford, 1990).

Material	Resistivitas (Ωm)
Air (udara)	0
Sandstones (Batu pasir)	200 – 8.000
Sand (Pasir)	1 – 1.000
Clay (Lempung)	1 – 100
Ground Water (Air Tanah)	0.5 – 300
Sea Water (Air Asin)	0.2
Dry Gravel (Kerikil Kering)	600 – 10.000
Alluvium (Aluvium)	10 – 800
Gravel (Kerikil)	100 – 600

Sifat konduktivitas listrik tanah dan batuan di permukaan sangat dipengaruhi oleh jumlah air, kadar garam/salinitas air dan sebaran air di dalam tanah dan batuan. Konduktivitas listrik batuan yang mengandung air sangat ditentukan terutama oleh sifat air, yakni elektrolit (larutan garam yang terkandung dalam air yang terdiri dari anion dan kation yang bergerak bebas dalam air). Adanya medan listrik eksternal menyebabkan kation dalam larutan elektrolit dipercepat menuju kutub positif dan anion menuju kutub positif. Tentu saja, batuan berpori atau pun tanah yang terisi air, nilai resistivitas (ρ) listriknya berkurang dengan bertambahnya kandungan air. Begitu pula sebaliknya, nilai resistivitas listriknya akan bertambah dengan berkurangnya kandungan air (Telford, 1990).



Resistivitas batuan memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung dari jenis material, densitas, porositas, kadar air, kadar temperatur, ukuran pori, dan bentuk batuan. Survei resistivitas memberikan gambaran tentang distribusi resistivitas bawah permukaan. Untuk mengubah bentuk resistivitas menjadi bentuk geologi, perlu diketahui nilai resistivitas tipikal dari masing-masing jenis material dan struktur geologi daerah penelitian. Adanya cairan atau air pada sistem retakan atau diantara butiran batu dapat menurunkan nilai resistivitas batuan (Halawa, dkk., 2022).

II. 6 Akuifer

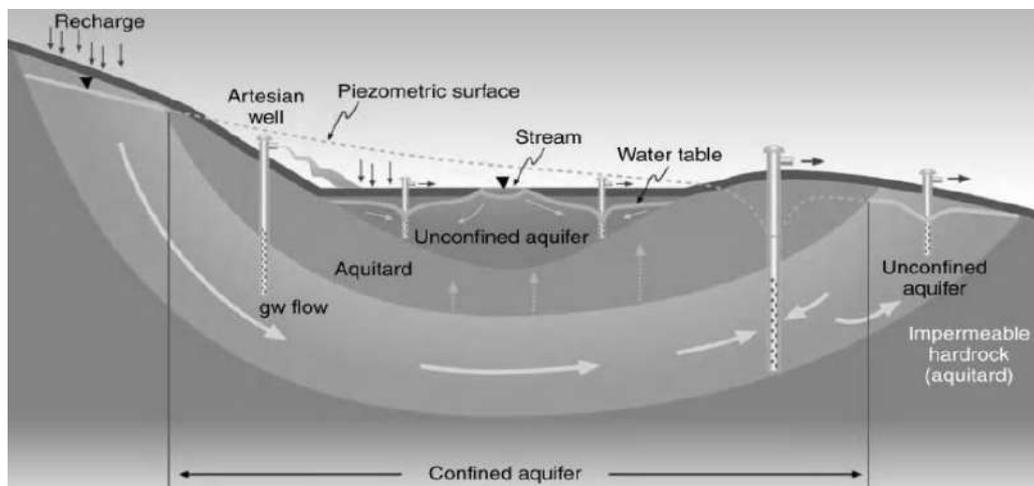
Air tanah adalah air yang bergerak di dalam tanah di antara butir-butir tanah yang meresap ke dalam tanah dan bergabung membentuk lapisan tanah yang disebut akuifer. Lapisan yang mudah dilalui oleh air tanah disebut lapisan *permeable*, misalnya lapisan yang terdapat pada pasir atau kerikil. Sedangkan lapisan yang sulit dilalui oleh air tanah disebut lapisan *imperbeable*, misalnya lapisan lempung. Akuifer adalah lapisan batuan di bawah tanah yang mengandung air dan dapat dilalui air. Akuifer adalah formasi geologi yang mengandung air atau kelompok formasi yang mampu mengalirkan air secara signifikan dalam keadaan alaminya. Akuifer adalah lapisan yang mengandung air (Todd, 1980).

Menurut Krussman dan Ridder (1970) bahwa akuifer dapat dikelompokkan menjadi berbagai macam, yaitu:

- a. Akuifer bebas (*unconfined aquifer*) yaitu lapisan air yang hanya sebagian terisi oleh air dan berada di atas lapisan kedap air. Permukaan tanah pada akuifer ini disebut dengan *water table* (*preatic level*), yaitu permukaan air yang mempunyai tekanan hidrostatik sama dengan kedalaman yang relatif dangkal atau kurang dari 40 m.
- b. Akuifer tertekan (*confined aquifer*) yaitu akuifer yang seluruh jumlahnya diisi oleh lapisan kedap air, baik yang atas maupun yang berada di bawah, mempunyai tekanan lebih besar daripada tekanan atmosfer.



- c. Akuifer semi tertekan (*semi confined aquifer*) yaitu akuifer yang seluruhnya jenuh air, dimana bagian atasnya dibatasi dengan lapisan semi lolos air pada bagian bawahnya merupakan lapisan kedap air.
- d. Akuifer semi bebas (*semi unconfined aquifer*) yaitu akuifer yang bagian bawahnya merupakan lapisan kedap air, sedangkan material atasnya merupakan material berbutir halus sehingga pada lapisan penutupnya masih memungkinkan adanya gerakan air. Dengan demikian akuifer ini merupakan peralihan antara akuifer bebas dengan akuifer semi tertekan



Gambar 2.8 Skema Keberadaan Air Tanah (Lehr & Keeley, 2005).

Akuifer mempunyai dua fungsi penting yaitu sebagai penyimpan seperti sebuah waduk dan sebagai penyalur air seperti jaringan pipa. Kedua fungsi tersebut diemban oleh pori-pori atau rongga di dalam batuan akuifer itu. Dua sifat yang terkait dengan fungsi penyimpanan ini adalah porositas (*porosity*) dan permeabilitas. Untuk mengidentifikasi keberadaan sumber air di kawasan tersebut, dilakukan identifikasi lapisan-lapisan akuifer. Akuifer tidak dapat dilihat secara langsung dari permukaan tanah, keberadaan akuifer di tempat yang berbeda juga memiliki kondisi (kedalaman dan ketebalan) yang berbeda. Terkadang sulit untuk menemukan akuifer di satu tempat, dan juga sangat mudah ditemukan. Dengan tidak bisa langsung mengebor, hal ini untuk meminimalisir biaya an, karena bisa saja lubang yang dibor kosong dan tidak ditemukan (Darsono, 2016).

